

塩害による鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の耐震信頼性評価

東北大学大学院 学生会員 ○猪股右樹
 東北大学大学院 フェロー 鈴木基行
 東京工業大学大学院 正会員 松崎 裕

東北大学大学院 正会員 秋山充良
 東北大学大学院 正会員 内藤英樹

1. はじめに

近年、材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能に関する研究が数多く行われており、これに基づき構造性能の低下を一定の範囲で許容することで、従来の構造性能の低下を一切許容しない場合に比べ、合理的な耐久設計になることが期待される。その実現のためには、材料劣化による構造性能の低下を表現できる力学モデルを構築し、その評価過程に介在する不確定性を適切に評価する必要がある。

本研究では、鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の耐震解析モデルの構築と耐震解析に伴う不確定性の整理を行う。また、現行の耐震設計規準に従い設計された RC 橋脚を対象に耐震信頼性評価を行い、材料劣化による耐震安全性の低下度合を定量評価する。

2. 鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の曲げ挙動解析

鉄筋腐食の生じた曲げ破壊型 RC 橋脚の最大応答変位 δ_{\max} は、骨格曲線をバイリニアモデル、履歴特性を武田モデルとした一自由度系の動的解析により求める。耐震解析の際、本研究では、i) 鉄筋腐食による破壊モードの変化は生じない、ii) 軸方向鉄筋の座屈前に軸方向鉄筋やせん断補強鉄筋の破断は生じない、iii) 鉄筋腐食の程度は質量減少率で表現する、iv) 部材や断面内の鉄筋腐食の非均一性は考慮しない、の4つの仮定を設けた。曲げ耐力や降伏・除荷剛性を求める際は、鉄筋腐食量に相当する分だけ断面積を減少させた鉄筋径を用いた。

3. 鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の終局変位

本研究では、著者らの軸方向鉄筋の座屈解析モデル¹⁾に基づき、鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の座屈発生点に対応する座屈発生時曲率 ϕ_u を求め、それを式(1)に代入して終局変位 δ_u (座屈発生時変位) を求める。

$$\delta_u = \delta_y + (\phi_u - \phi_y) L_p (h - L_p / 2) \quad (1)$$

$$L_p = 0.5d + 0.05h \quad (2)$$

$$\delta_y = \frac{P_u}{P_{y0}} \delta_{y0} \quad (3)$$

$$\phi_y = \frac{P_u}{P_{y0}} \phi_{y0} \quad (4)$$

ここで、 δ_{y0} と ϕ_{y0} は最外縁引張鉄筋が降伏したときの変位(初降伏変位)と曲率、 h はせん断スパン、 L_p は塑性ヒンジ長²⁾、 d は断面の有効高さである。ただし、座屈発生時曲率 ϕ_u を求める参考文献1)のモデルに対し、横拘束筋とかぶりコンクリートによる拘束力 Q_w と q_c の算定式をそれぞれ以下のように修正する。これは、鉄筋腐食による断面積の減少や、鉄筋周りにある腐食生成物の影響を考慮するためである。

$$Q_w = a_{wle} \sigma_{wy} \quad (5)$$

$$q_c = k \beta_1 \beta_2' d_{se} D_r' \sigma_c^{2/3} \quad (6)$$

$$a_{wle} = \begin{cases} N_w a_w' / N_L & (N_L < 5) \\ N_w a_w' / (0.2 N_L + 4) & (N_L \geq 5) \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta_1 = 1 - 0.75(\varepsilon_{\max} / \varepsilon_c) \quad (\beta_1 \geq 0.25) \quad (8)$$

$$\beta_2' = \begin{cases} 1.0 & (\text{腐食ひび割れ発生前}) \\ \exp(-0.074C) & (\text{腐食ひび割れ発生後}) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 $k = 0.03$ 、 a_{wle} は横拘束筋断面積、 σ_{wy} は帯鉄筋の降伏強度、 N_L は載荷面に配置された軸方向鉄筋の本数、 N_w は載荷面に配置された軸方向鉄筋を拘束する帯鉄筋および中間帯鉄筋の本数、 a_w' は帯鉄筋および中間帯鉄筋の未腐食部分の断面積、 β_1 は圧縮ひずみの影響を考慮した低減係数、 β_2' は軸方向鉄筋の腐食によるかぶりコンクリートの座屈抵抗力の低減係数、 d_{se} はコンクリート圧縮縁から圧縮鉄筋までの最短距離、 D_r' は腐食量を除去した軸方向鉄筋の断面積 A_m' と等しくなる等価軸方向鉄筋径、 ε_{\max} は断面解析から得られる圧縮鉄筋位置のひずみ、 σ_c および ε_c はかぶりコンクリートの圧縮強度と圧縮強度ひずみ、 C は軸方向鉄筋の質量減少率(%)である。

キーワード 鉄筋腐食、終局変位、信頼性理論、耐震性能、フラジリティ曲線

連絡先 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-06 TEL:022-795-7449

表-1 検討に用いた RC 供試体の一覧

実験者	供試体名	供試体数 (括弧内は 劣化部材の数)
加藤ら ³⁾	N, <u>A</u> , <u>B</u>	3体(2体)
加藤ら ⁴⁾	N-01~N-03, N-1~N-5, EM-0, <u>EM-1</u> ,EM-2, ES-0, <u>ES-1</u> ,SS-0, <u>SS-1</u>	15体(9体)
大屋戸 ⁵⁾	No.1, <u>No.2</u> ~No.9	9体(8体)

※アンダーライン付は腐食供試体を示す。

表-2 耐震信頼性評価に用いる不確定要因の一覧

	平均	変動係数
曲げ耐力	1.01	0.061
剛性	1.00	0.219
終局変位	1.10	0.340

4. 鉄筋腐食が生じた RC 橋脚の耐震解析に伴う不確定性の整理

前記の条件により求められた曲げ耐力や降伏・除荷剛性、および終局変位 δ_u は、力学モデルの不完全さなどのため、その計算値と実験値は完全に一致しない。そこで、表-1の供試体から得られた実験値を用いて、 χ =(実験値)/(計算値)の統計量を表-2のように得た。

5. 耐震信頼性評価

ある地震動最大速度に対してモンテカルロシミュレーションを行い、橋脚の条件付損傷確率(最大応答変位が終局変位を上回る可能性)を求めた。解析には、前記の耐震解析に伴う不確定性に加えて、コンクリート圧縮強度とその弾性係数、および鉄筋の降伏強度とその弾性係数に関する不確定性も考慮した⁶⁾。

現行の道路橋示方書⁷⁾に従い試設計した表-3に示す橋脚を対象にフラジリティ曲線を得た。結果を図-1に示す。腐食ひび割れ発生(質量減少率1.35%)では健全橋脚(質量減少率0%)に比べ、明確な耐震安全性の低下はみられない。一方、質量減少率5%の鉄筋腐食が生じると、健全橋脚に比べて耐震安全性が有意に低下することが確認できる。

6. まとめ

本研究では、鉄筋腐食が生じたRC橋脚を対象に、その耐震性能の低下を評価するための解析モデルの構築と、耐震解析に伴う不確定性の整理を行った。そして、耐震信頼性評価を実施し、鉄筋腐食に伴うRC橋脚の耐震安全性の低下程度を損傷確率により

表-3 検討対象橋脚(橋軸方向)

断面寸法	幅	5.0m
	高さ	1.25m
軸方向鉄筋比		2.31%
横拘束筋体積比		1.03%
固有周期		0.40s

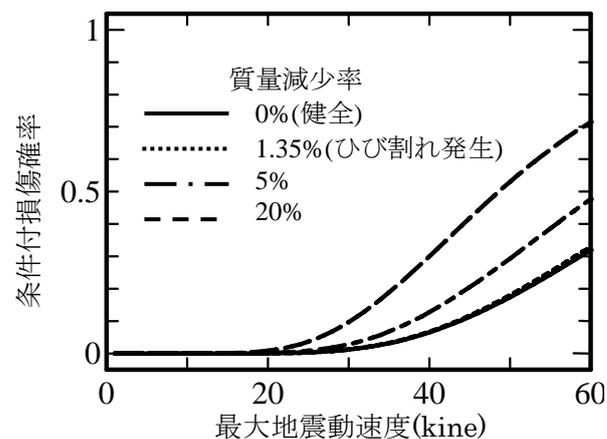


図-1 フラジリティ曲線

定量化した。その結果、鉄筋腐食を腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量までに抑えれば、RC橋脚の耐震安全性の低下は無視できることが示された。

参考文献

- 1) 秋山充良, 内藤英樹, 鈴木基行: 軸方向鉄筋の座屈発生点に対応した終局曲率の簡易算定法およびRC柱とSRC柱の靱性能評価への適用, 土木学会論文集, Vol.725/V-58, pp.113-129, 2003
- 2) Mattock, A.H.: Rotational Capacity of Hinging Regions in Reinforced Concrete Beams, ACI, SP12, pp.85-142, 1965.
- 3) 加藤絵万, 岩波光保, 伊藤始, 横田弘: 繰返し荷重を受けるRC柱の構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1489-1494, 2005.
- 4) 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘, 中村晃史, 伊藤始: 繰返し荷重を受けるRCはりの構造性能に及ぼす鉄筋腐食の影響, 港湾空港技術研究所資料, No.1079, 2005.
- 5) 大屋戸理明: 腐食した鉄骨コンクリート部材の力学性能の評価, つくば大学学位論文, 2007.
- 6) 秋山充良, 土井充, 松中亮治, 鈴木基行: 構造系の信頼性を考慮したRC橋脚の耐震設計に用いる安全係数の試算, 土木学会論文集, Vol.718/V-57, pp.1-17, 2002.
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.